INDICATIONS SUR LA CONCEPTION, LE DIMENSIONNEMENT ET LES EQUIPEMENTS DES PONTS

I Introduction

L'objectif qui préside à la conception d'un ouvrage d'art est de lui conférer des qualités fonctionnelles, économiques et esthétiques.

Que l'ouvrage doive être adapté aux contraintes fonctionnelles (voie portée, obstacles franchies) qui lui sont imposées est une évidence. Qu'il puisse être réalisé au meilleur coût est une nécessité d'ordre budgétaire. I l est également essentiel de veiller à lui donner des formes et des proportions permettant une intégration satisfaisante dans le site.

La démarche de conception consistera donc à fixer les choix fondamentaux avant de s'intéresser aux détails, en procédant par étape et affinements, successifs. C'est ainsi que l'implantation des appuis et le choix du type de liaison longitudinale, qui relèvent de la conception générale de l'ouvrage, doivent précéder le ***dimensionnement détaillé des différents éléments*** ainsi que les ***choix de parti relatifs aux équipements ou aux corniches***. Aucun élément de l'ouvrage ne doit toutefois être négligé, puisque tous concourent à sa pérennité.

La première phase de l'étude technique d'un projet consiste à rassembler les renseignements relatifs à l'emplacement de l'ouvrage, aux données naturelles et aux contraintes de site à respecter.

Ces informations sont en règle générale à fournir par le maître de l'ouvrage au projeteur (ou l'auteur de du projet). Mais ce dernier ne doit pas se borner à attendre qu'elles lui parviennent, il lui appartient de le demander en précisant ce qui lui est nécessaire, et souvent de les rechercher lui-même.

Il ne devra négliger de se renseigner à temps sur les équipements qui peuvent avoir une influence sur les dispositions de l'ouvrage, par exemple les canalisations et l'éclairage éventuel.

Il est rappelé que les conditions à respecter pendant la construction peuvent être déterminées dans le choix à faire dés le début du projet.

En fin, il est vivement conseillé au projeteur du projet de faire une visite sur place avant de commencer ses études, pour bien se rendre compte de la disposition des lieux et aussi pour examiner l'environnement et pour voir, mieux que sur de simples photographies, le paysage avec lequel le pont devra s'harmoniser.

Lorsque les premiers renseignements indispensables sont parvenus, on procède au choix du type d'ouvrage, ou des différents types possibles.

A ce stade, les dimensions ne peuvent et ne doivent être qu'approximatives.
Elles résultent de l'examen d'ouvrages analogues récents et de règles très simples qui donnent notamment l'ordre de grandeur des portées économiques suivant les types, des rapports entre les longueurs des travées de rive et celles des travées centrales, des épaisseurs du tablier en fonction des portées ; les seuls calculs à faire sont des règles de trois.

Il faut se préoccuper dés ce stade du type et de l'importance des fondations à prévoir, compte tenu des renseignements dont on dispose sur le sol.

II Indications sur le calcul des ponts. (*Le calcul n'est qu'un outil !*)

On ne calcule jamais que ce qu'on a projeté auparavant.

Il faut toujours commencer par dessiner, d'abord les grades lignes de l'ouvrage, puis ses dispositions constructives.

C'est une tendance très générale des jeunes ingénieurs de se lances trop vite dans les calculs trop poussés. Il faut toujours commencer par dessiner, d'abord les grandes lignes de l'ouvrage, puis ses dispositions constructives.

Avant tout calcul, il est indispensable de faire appel au bon sens, à l'expérience et à l'intuition pour contrôler, en examinant les dessins, que l'équilibre statique est assurée, que chaque pièce parait correctement dimensionnée, que les efforts se transmettent convenablement, qu'il n'y aura pas d'efforts secondaires trop importants, qu'il n'existe aucune discontinuité dangereuse, que les dispositions envisagées peuvent être effectivement exécutées, etc.

Le calcul n'intervient qu'ensuite, pour préciser le dimensionnement, par approximations successives. On passe ainsi alternativement du dessin au calcul jusqu'au moment où chaque élément satisfait strictement aux conditions de résistance imposées

Au fur et à mesure de l'élaboration du projet, le ***calcul peut être utilisé pour déterminer à l'avance les dimensions de certaines pièces***. Mais les calculs de détermination n'ont pas à figurer dans les notes de calculs, qui doivent comporter exclusivement les calculs justificatives des dispositions adoptées telle qu'elles figurent sur dessins.

II.1 Construction réelle et schéma de calcul

En résistance des matériaux, on commence l'étude de la résistance d'une construction par le choix d'un schéma de calcul.

Abordant le calcul d'une construction, il convient tout d'abord de dégager l'essentiel dans le cas donné **:**

- il faut ***schématiser*** la construction et la ***dépouiller*** de tous les facteurs non susceptibles d'influencer tant soit peu le travail du système tout entier.

Une ***construction réelle dépouillée de toutes ses particularités inessentielles est appelée schéma de calcul***. Pour une seule et même construction on peut proposer plusieurs schémas de calcul, en premier lieu en fonction de la précision requise et de l'aspect du phénomène intéressant l'ingénieur.

S'il est vrai qu'on puisse proposer pour une construction plusieurs schémas de calcul, on peut faire correspondre par ailleurs à un schéma un grand nombre de constructions réelles. Cette dernière circonstance est très importante, car faisant l'étude d'un schéma, on peut obtenir la solution de toute une classe de problèmes réels se réduisent au schéma donné. Notamment, le schéma du câble chargé à son extrémité est très répandu et on le rencontre dans un grand nombre de cas pratiques de calcul de résistance.

Notons que dans le cas d'un pont à travées multiples, lorsque l'implantation des appuis, donc la répartition des travées, ainsi que le type d'ouvrage ont été déterminés, il importe de compléter le ***schéma statique longitudinal en choisissant le type de liaison des travées***.

En effet, ce choix conditionne non seulement la conception du tablier, mais aussi et pour une large part celle des appuis et des appareils d'appui ainsi que celle des joints de chaussée.

Pour cela, les deux solutions suivantes peuvent être envisagées :
La première solution est constituée de travées indépendantes, attelées par des dallettes en béton armé.

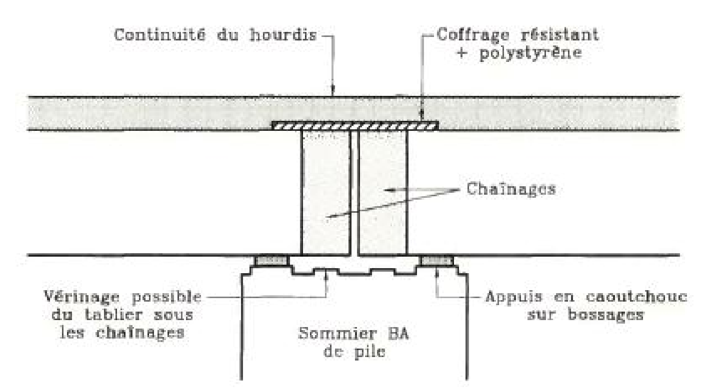


Figure 2.1 : Coupe longitudinale sur appui d'un tablier à poutres à travées **indépendantes**

La seconde solution est formée par des travées continues. La continuité est réalisée, après pose des poutres sur des appuis provisoires, par un clavage de béton coulé en place.

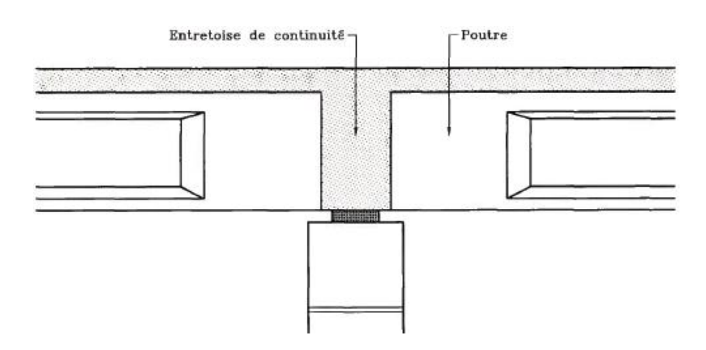


Figure 2.2 : Coupe longitudinale sur appui d'un tablier à poutres à travées **continues**

III Conception des ponts à poutres préfabriquées en béton armé à travées indépendantes

L'objectif qui préside à la conception d'un ouvrage d'art est de lui conférer des qualités fonctionnelles, économiques et esthétiques.
Que l'ouvrage doive être adapté aux contraintes fonctionnelles (voie portée, obstacles franchis) qui lui sont imposées est une évidence. Qu'il puisse être réalisé au meilleur coût est une nécessité d'ordre budgétaire. Il est également essentiel de veiller à lui donner des formes et des proportions permettant une intégration satisfaisante dans le site.
La démarche de conception consistera donc à fixer les choix fondamentaux avant de s'intéresser aux détails, en procédant par étapes et affinements successifs. C'est ainsi que l'implantation des appuis et le choix du type de liaison longitudinale, qui relèvent de la conception générale de l'ouvrage, doivent précéder le dimensionnement détaillé des différents

éléments ainsi que les choix de parti relatifs aux équipements ou aux corniches.
Aucun élément de l'ouvrage ne doit toutefois être négligé, puisque tous concourent à sa pérennité.

III.1 Adaptation aux caractéristiques du tracé.

III.1.1 Profil en long.

Pour parvenir à une solution satisfaisante, il est nécessaire d'assurer une bonne coordination entre les études géométriques de tracé et les études d'ouvrage d'art. En particulier, la définition du profil en long doit faire l'objet d'une concertation avec les auteurs du projet routier d'ensemble. Un principe général à observer pour obtenir une ligne harmonieuse consiste à ne pas associer sur un même ouvrage des profils rectilignes et curvilignes.

En tout état de cause, un ***profil rectiligne est préférable*** lorsque la voie portée présente une pente longitudinale. Si un profil circulaire est nécessaire, par exemple pour faciliter l'évacuation des eaux de ruissellement, le profil théorique est approché par une ligne polygonale dont les sommets sont situés sur les appuis.

Etant donné que les rayons de courbure habituels sont très grands vis-à-vis des portées, cette approximation conduit à un profil en long généralement acceptable.

III.1.2 Implantation des appuis et choix du type d'ouvrage.

L'implantation des appuis constitue une étape importante dans la conception de l'ouvrage, puisque la répartition des travées, la longueur totale de l'ouvrage ainsi que le choix du type d'ouvrage en dépendent pour une très large part.

Cette implantation doit respecter les contraintes géométriques et topographiques liées à la brèche (gabarits routiers ou ferroviaires, obstacles divers, visibilité, etc.), et tenir compte des données géotechniques (portance et tassements éventuels du sol de fondation, etc.) ainsi que des données hydrologiques dans le cas de franchissements de cours d'eau.

Le respect de ces contraintes et de ces données permettant d'aboutir à une ou à plusieurs solutions de répartition des travées, par exemple le choix d'une solution de type *PRAD* (Poutres Précontraintes par Adhérence) est possible lorsque la longueur des travées est comprise entre une douzaine et une trentaine de mètres.

En raison des spécificités (préfabrication notamment) de ce type de structure, son emploi est particulièrement avantageux dans un certain nombre de situations, comme par exemple dans le cas des ouvrages comportant une travée unique ou plusieurs travées de longueur égale.

En effet, toutes les poutres de l'ouvrage sont alors identiques, qu'il s'agisse du coffrage, des armatures de précontrainte ou du ferraillage.

En outre, l'***optimum économique*** est atteint lorsque les portées se situent dans la plage supérieure du domaine d'emploi de la structure, surtout si les fondations sont coûteuses.

Cependant, les ***caractéristiques de la brèche*** ne permettent pas toujours de réaliser l'implantation d'appuis équidistants. C'est notamment le cas des passages supérieurs qui franchissent des voies routières ou autoroutières ou encore des voies ferrées **:**
les travées de rive sont généralement plus courtes que la ou les travées intermédiaires.

Cela ne fait néanmoins pas obstacle à l'utilisation d'une solution de type *PRAD.*

Dans tous les cas, il est impératif, pour des considérations évidentes d'aspect général de l'ouvrage, que le tablier soit d'épaisseur constante. Dans le cas des travées inégales, *il peut donc arriver que le profil des poutres*, dimensionné pour la *travée la plus longue*, se révèle surabondant pour les petites travées. Il n'est toutefois pas difficile d'y remédier.

En effet, lorsque les ***travées sont isostatiques***, il est ***possible d'adapter l'espacement des poutres en fonction de la portée***. En revanche, dans le cas des travées rendues continues, un

non-alignement des poutres serait susceptible d'engendrer des efforts de torsion parasites dans le noyau de clavage.

Il est alors préférable de ***conserver le même nombre de poutres dans toutes les travées*** ; les adaptations à effectuer concernent le nombre et la position des armatures de précontrainte ainsi que le ferraillage passif.

III.1.3 Tablier

Après avoir fixé le *schéma statique longitudinal de l'ouvrage*, la *démarche de conception* du projeteur consiste à calculer la ***longueur de calcul de la poutre principale*** L_C ,
(voir Figure n° 3.1) et à *dimensionner* les *éléments constitutifs du tablier (voir la figure n°3.2)*, en tenant compte des contraintes du projet, notamment celles relatives au gabarit.

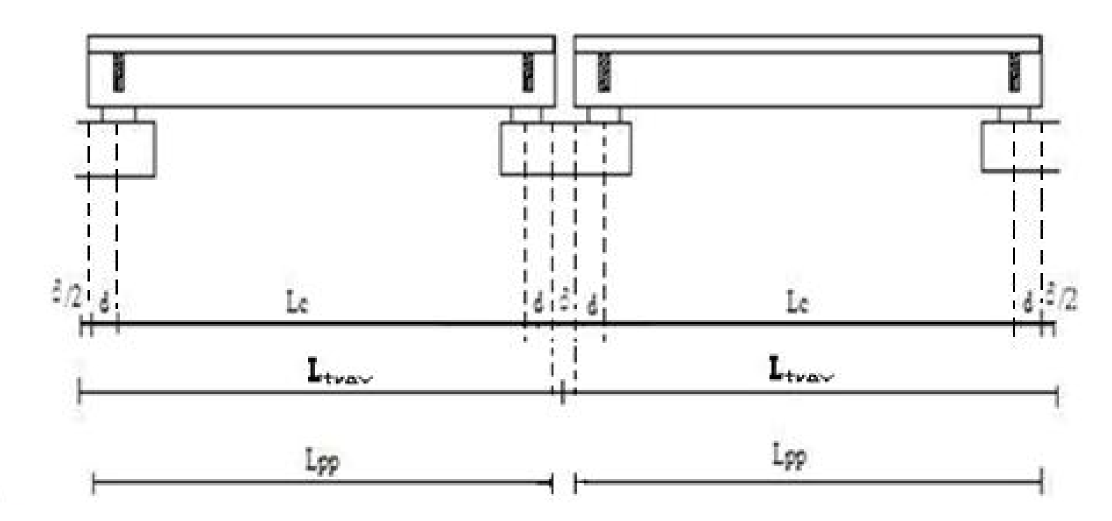


Figure 3.1 : Coupe schématique longitudinale d’un tablier à travées indépendantes

Avec :

- d : about de la poutre principale (d= 0,30 à 0,55 m)
- δ : joint de délitation du béton
- L_{pp} : longueur de la poutre principale
- L_c : longueur de calcul
- L_{tra} : portée de la travée considérée

$$\Rightarrow \quad \mathbf{L_c = L_{tr} + 2d + 2(\delta/2)}$$

En pratique ; $\delta << L_{trv}$. Donc on peut négliger δ ; (δ=0).
Alors : $Lc = L_{trav} - 2d$. (Voir la figure ci-dessous).

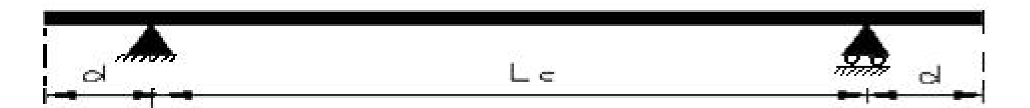


Figure 3.2 : Schéma de calcul d'une poutre principale

L'***élancement habituel du tablier*** des travées isostatiques se situe aux environs du

$$\mathbf{1/20\text{-}1/17 \leq h_P/L_c \leq 1/12\text{-}1/15.}$$

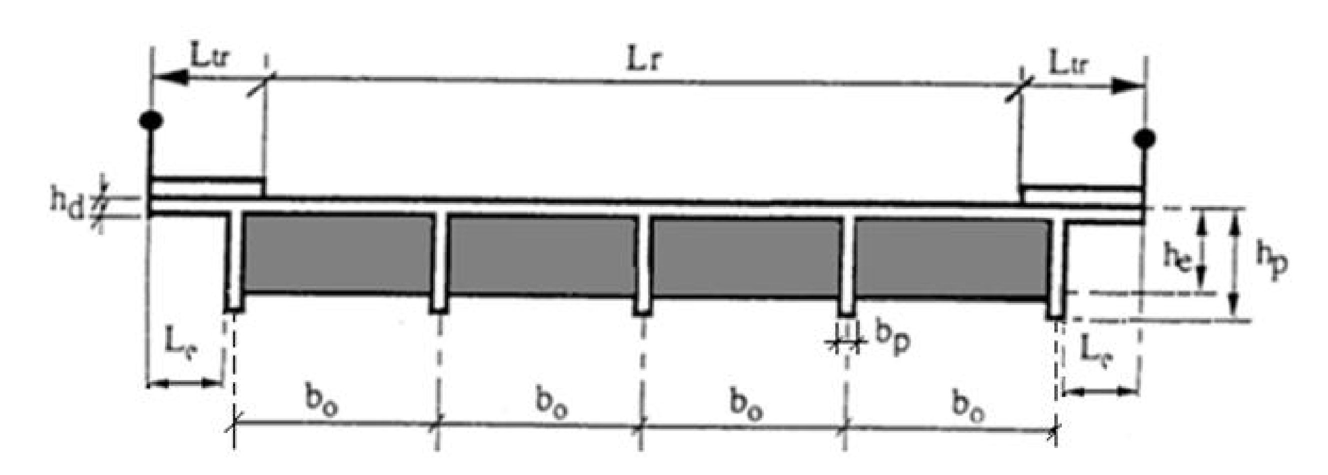


Figure 3.3 : Profil schématique sur appui d'un tablier à poutres en BA.

III.1.4 Eléments longitudinaux (*poutres principaux*).

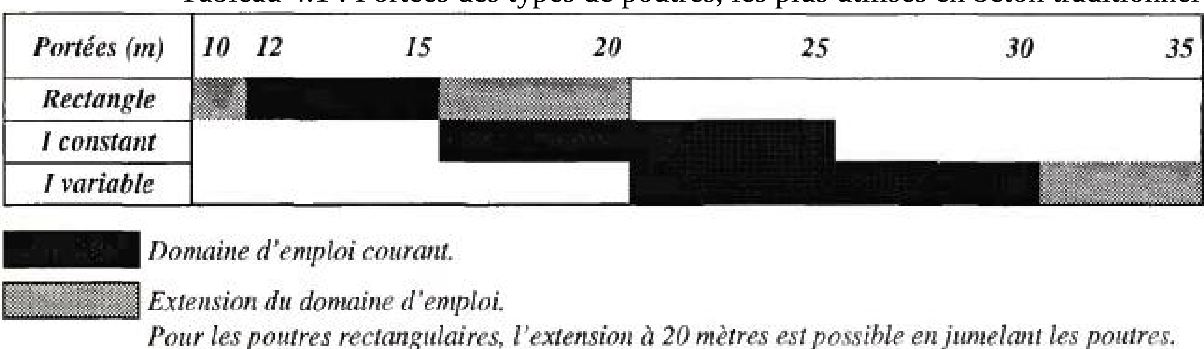
Rappelons en préliminaire qu'en raison du procédé de précontrainte utilisé, qui nécessite la mise en œuvre d'infrastructures importantes, les poutres précontraintes par pré-tension sont systématiquement fabriquées en usine.

Il s'agit le plus souvent d'une usine fixe, qui produit industriellement des éléments de profil déterminé. Il existe ainsi des gammes de produits prenant place dans un ***catalogue***, propre à *chaque préfabricant*.

Les productions couramment fabriquées en France et également en **Tunisie** pour une utilisation dans le domaine des ponts permettent de couvrir l'ensemble du domaine d'emploi défini au tableau ci-dessous n° 4.1.

Lorsque l'on s'élève dans la gamme des portées, on part du profil le plus rustique, la poutre rectangulaire, pour aller vers des profils plus élaborés tels que par exemple la poutre en ***double Té***.

Tableau 4.1 : Portées des types de poutres, les plus utilisés en béton traditionnel



Portées (m)	10	12	15	20	25	30	35
Rectangle							
I constant							
I variable							

Domaine d'emploi courant.

Extension du domaine d'emploi.
Pour les poutres rectangulaires, l'extension à 20 mètres est possible en jumelant les poutres.

Le projeteur choisit donc un profil de poutre, en fonction de la portée, sur un catalogue de produits existants. Par ordre de portées croissantes, les types de poutres les plus courants sont les suivants :

III.1.4.1 Poutre rectangulaire

C'est bien sûr la forme la plus simple. Si le ***rendement géométrique de la section* ρ *=1/3*** est médiocre, le coffrage qui permet de la réaliser est le moins coûteux.
Ce type de poutres est couramment utilisé jusqu'à des ***portées*** L_{trav} ***d'environ 15 à 16 mètres***. Notons que l'emploi des bétons à hautes performances permet d'élargir les gammes de portées de ce type de poutres. Selon les usines, sa ***largeur*** b_p ***peut varier de 0,15-0,25 à 0,40 mètres***.

La gamme des ***hauteurs hp varie généralement entre 30 et 80 centimètres***.

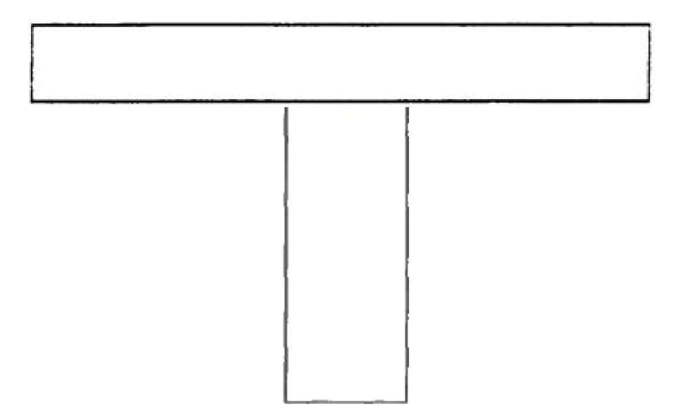


Figure 3.4 : Poutre à section rectangulaire

III.1.4.2 Poutre en I de section constante sur toute sa longueur

Constituée de deux membrures (symétriques ou non) solidarisées par une âme verticale, cette section présente un meilleur ***rendement*** (**ρ**), ***pouvant atteindre 0,45 voire 0,50 mètres***.

Ce type de poutres prend le relais de la ***poutre rectangulaire à partir d'une quinzaine de mètres jusqu'à des portées d'environ 25 mètres***. Il reste néanmoins possible de les choisir pour des portées moindres.

Les membrures inférieure et supérieure ont le plus souvent la même largeur, mais parfois, notamment pour réaliser une sous-face de tablier continue, on utilise des poutres à large membrure inférieure, disposées de façon jointive. Nous avons déjà indiqué que l'emploi des bétons à hautes performances permet également dans ce cas d'élargir les gammes de portées.

Ce type de poutres peut être utilisé lorsque le calcul des contraintes de cisaillement montre que l'épaisseur courante de l'âme est suffisante, même au voisinage des appuis.

- ***La gamme des hauteurs hp courantes va de 0,80 à 1,20 mètre.***
- ***Les largeurs de talon (b_{ta}) sont de l'ordre de 0,40 à 0,50 mètres.***
- ***La largeur de l'âme, généralement comprise entre 0,15 et 0,20 mètres***, est choisie en fonction de l'espacement entre axes des poutres.

Les épaisseurs aux extrémités des membrures inférieure et supérieure ainsi que les pentes des goussets de raccordement à l'âme ont des valeurs particulières à chaque **préfabricant**.

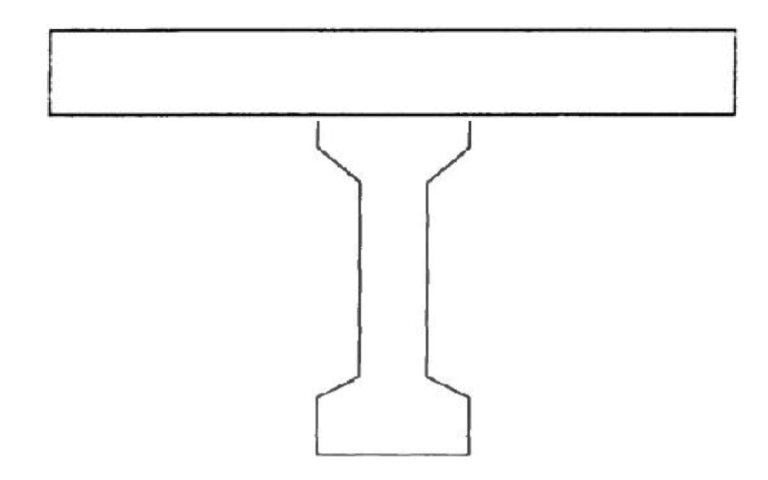


Figure 3.5 : Poutre en I de section constante sur toute sa longueur

III.1.4.3 Poutre en I avec épaississement rectangulaire aux abouts

II arrive fréquemment, par exemple pour les grandes portées, ou encore quand les espacements de poutres sont importants, que l'épaisseur courante de l'âme se révèle insuffisante vis-à-vis des contraintes de cisaillement au voisinage des appuis. Un épaississement de l'âme dans cette zone est alors nécessaire. Il est obtenu par la réalisation de blocs d'about de section rectangulaire, également appelés blochets d'extrémité, qui se raccordent en sifflet (sur une vue en plan) avec la section en I courante.

Le domaine d'emploi de ce type de poutres chevauche le précédent pour des ***portées L_{trav} comprises entre 20 et 25 mètres***.

L'*épaississement de l'âme aux extrémités* permet le cas échéant la mise en **œuvre** d'armatures déviées en élévation. Notons ici encore que l'emploi des bétons à hautes performances permet d'élargir les gammes de portées de ce type de poutres.

Il existe aussi d'autres types d'éléments préfabriqués, d'usage moins fréquent, caractérisés par la présence de deux ou plusieurs âmes. L'intérêt principal de ces éléments, plus larges que des poutres individuelles, étant de diminuer le nombre de manutentions, on y recourt principalement quand les surfaces à couvrir sont particulièrement importantes. On rencontre notamment les formes de sections suivantes :

Le *recours à ce type de poutres devient nécessaire si le cumul des contraintes de cisaillement dues à l'effort tranchant, à la torsion et à l'introduction de la précontrainte n'autorise plus le choix d'une âme d'épaisseur constante*. On est amené dans ce cas à renforcer l'épaisseur de l'âme dans la zone proche des appuis.

La poutre présente ainsi en partie courante une section en I à âme mince, dont l'épaisseur est de l'ordre de 0,15 mètres (0,13 mètres semblant constituer un strict minimum pour respecter l'enrobage des étriers) et aux extrémités, une section rectangulaire.

Le raccordement entre les deux types de sections est progressif. La longueur du blochet d'extrémité résulte des calculs de cisaillement.

On a déjà indiqué que ce profil était particulièrement bien adapté pour permettre la réalisation des très grandes portées du domaine d'emploi. C'est pourquoi la gamme des ***hauteurs hp*** s'échelonne entre ***1,00 et 1,80 mètre***. Les ***largeurs de talon (b_{ta}) peuvent atteindre une soixantaine de centimètres. (0,60 m).***

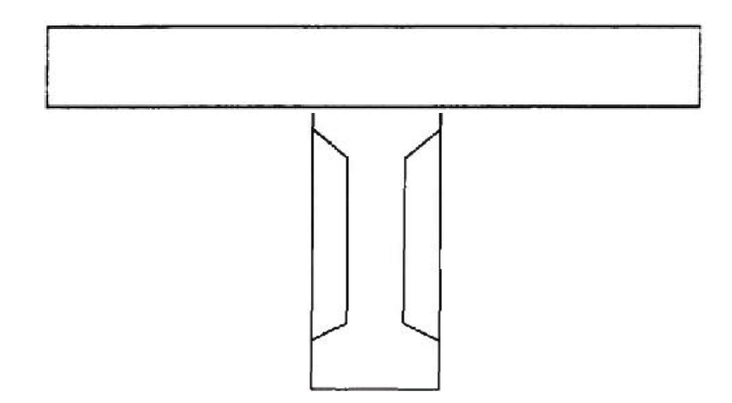


Figure 3.6 : Poutre en I avec épaississement rectangulaire aux abouts

III.1.4.4 Poutre trapézoïdale

Sa réalisation ne nécessite pas non plus de moules compliqués.

La petite base peut être située soit en fibre inférieure, soit en fibre supérieure de la poutre.

Le domaine d'utilisation est analogue à celui de la poutre rectangulaire. Elle présente des dimensions analogues à celles des poutres rectangulaires. Les ***deux variantes possibles*** quant à la position de la petite base résultent de la conception retenue pour le coffrage.

Dans le cas de la ***petite base inférieure, dont la largeur peut aller de 0,20 à 0,30 mètres***, un moule "cuvette" permet le décoffrage instantané de l'élément grâce à la cambrure provoquée par la mise en précontrainte (relâchement des armatures).

Lorsqu'au contraire la petite base est située en fibre supérieure de la poutre, le coffrage utilisé est du type moule "pondeur".

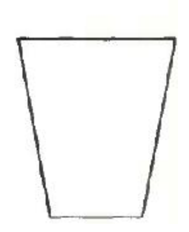


Figure 3.7 : Poutre trapézoïdale

III.1.4.5 Poutre de section en auge

Elle dérive de la section trapézoïdale à petite base inférieure et comme celle-ci, convient aux petites et moyennes portées.

Dans ce type de poutres, ainsi que pour les caissons, il est prudent de ménager des ouvertures pour le drainage en partie inférieure, afin d'éviter les risques d'accumulation d'eau.

Ce profil est obtenu à partir du précédent (trapèze à petite base inférieure) en écartant les parois extérieures du coffrage et en créant un évidement central. Comme il est en outre nécessaire, pour respecter les enrobages, de donner une épaisseur suffisante aux nervures latérales, la largeur à la base de la poutre doit être sensiblement plus importante.

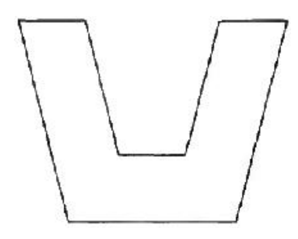


Figure 3.8 : Poutre de section en auge

III.1.4.6 Poutre de section en auge renversée, ou en pi

Elle peut être considérée comme le jumelage de deux poutres en Té. Elle est également adaptée aux portées moyennes. Pour les ponts-routes, elle est associée à un hourdis coulé en place.

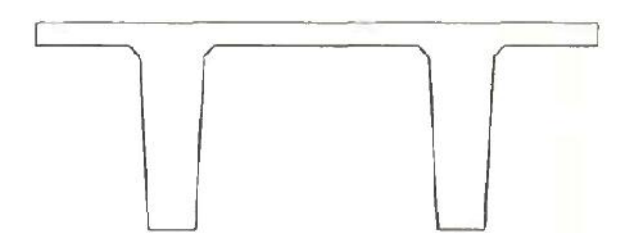


Figure 3.9 : Poutre de section en auge renversée, ou en pi

III.1.4.7 Poutre-caisson

Les caissons peuvent être monocellulaires ou multicellulaires ; le ***bon rendement* (ρ) *géométrique de ce profil, voisin de 0,60 m***, permet de plus la réalisation d'ouvrages particulièrement élancés.

On les utilise généralement dans une gamme de ***portées*** L_{trav} ***allant de 15 à 25 mètres***. Leur particularité réside dans le fait qu'ils peuvent être utilisés sans hourdis coulé en place et peuvent ainsi recevoir directement, une fois assemblés, l'étanchéité et le revêtement de chaussée. Rien ne s'oppose toutefois à leur utilisation, comme des poutres classiques, avec un hourdis coulé in situ.

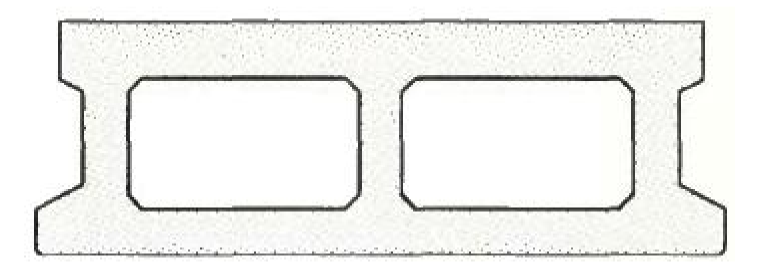


Figure 3.10: Poutre-caisson

III.1.4.8 Distance entraxe des poutres principales b_0

$\Rightarrow$ b_0 = (1,0 à 2.0 -2,20 m)

III.1.4.8 Epaisseur du hourdis h_d

Le hourdis a double rôle ; il fonctionne :

- Comme couverture sous action des surcharges locales,
- Comme membrure supérieure des poutres dans la flexion générale de l'ouvrage

$\Rightarrow$ h_d = (0.12 à 0.2 m), selon l'espacement des poutres principales

III.1.4.9 Hauteur de l'entretoise h_e

$\Rightarrow$ h_e= (0.8 à 0.9) h_p ; [(h_p - h_e) ≥ 0,15 m]

III.1.4.10 Epaisseur de l'entretoise b_e

Epaisseur : tient compte des conditions d'enrobage des armatures et de mise en œuvre du béton.

$\Rightarrow$ b_e = (0.12 à 0.40 m)

III.1.4.11 Longueur de l'encorbellement L_e ; (s'il existe)

Le nombre de poutres étant fixé, leur écartement dépend de l'encorbellement L_e (voir la figure ci-dessous) au-delà de la poutre de rive, on réduit cet espacement en mettant la plus grande partie possible du trottoir en encorbellement, respectant toutefois la condition suivante relative à la portée de l'encorbellement :

$\Rightarrow$ $L_e \leq$ (h_p /2 à b_0 /2)

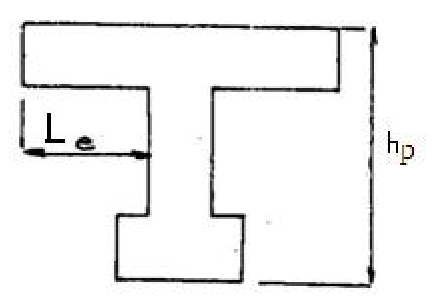


Figure 3.11: Profil d'une poutre de rive

NB : on est amené à prendre un encorbellement nul pour éviter l'emploi d'un coffrage en porte à faux.

V Ponts à poutres en béton précontraint à travées indépendantes

V.1 Pré-dimensionnement des ponts à poutres en BP (voir figure ci-dessous)

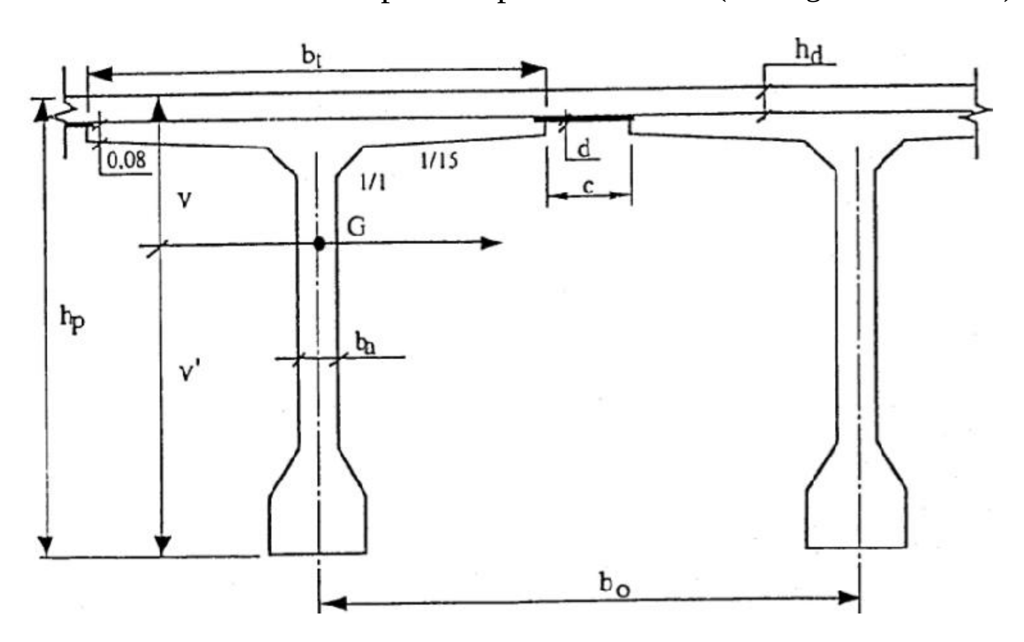


Figure 4.1: Différents paramètres dimensionnels d'une poutre en BP

- Hauteur des poutres

La hauteur des poutres se déduira du choix adopté pour le type de hourdis et de l'épaisseur même du hourdis. Dans le cas d'un ***hourdis général*** [1] coulé par-dessus les poutres, la hauteur de la poutre se déduit de la hauteur totale du tablier en retranchant l'épaisseur du hourdis. Dans le cas d'un ***hourdis intermédiaire*** [2], coulé entre les poutres, la hauteur totale du tablier et la hauteur des poutres sont identiques.

L'élancement habituel du tablier des travées isostatiques se situe aux environs du

$$1/16 \leq h_P/L_c \leq 1/18.$$

- Entraxe des poutres : b_o = 2,50 m à 3.5 m ; (exceptionnellement 4,00 m).

- Nombre des poutres (N_{PP})

Le nombre de poutres dépend essentiellement de la largeur du tablier et de la position des poutres de rive.

Dans la mesure du possible, on cherchera à positionner les poutres de rive le plus près des bords libres du tablier, de manière à ***supprimer la partie de hourdis à couler en encorbellement de ces poutres de rive***, difficile à coffrer. Cette facilité *ne peut être obtenue dans le cas d'un ouvrage courbe, puisque dans un tel cas, comme nous l'avons déjà mentionné, la courbure est rattrapée par le hourdis en débord des poutres de rive*.

La position des poutres de rive est également conditionnée par la position du fil d'eau, et il convient de veiller à ce que les descentes d'eau soient suffisamment éloignées de l'axe des poutres, où sont ancrés des câbles de précontrainte. Les dispositifs d'évacuation des eaux seront donc situés soit à l'extérieur, soit à l'intérieur de la poutre de rive.

Lorsque le trottoir est étroit, les gargouilles sont situées à l'extérieur de la poutre de rive. Dans ce cas, à moins de prévoir le recueil des eaux, ce qui est souhaitable pour le respect de l'environnement, des coulures risquent de souiller le parement vu du flanc des poutres et ainsi de nuire à l'esthétique de l'ouvrage.

Au contraire, quand le trottoir est relativement large, les gargouilles sont situées à l'intérieur de la poutre de rive.

Dans le cas où l'axe de la poutre de rive coïnciderait avec la position du fil d'eau, il paraît judicieux d'augmenter ou de diminuer la largeur de la table de compression des poutres, plutôt que de prévoir la réalisation d'une zone de hourdis en encorbellement des poutres de rive.

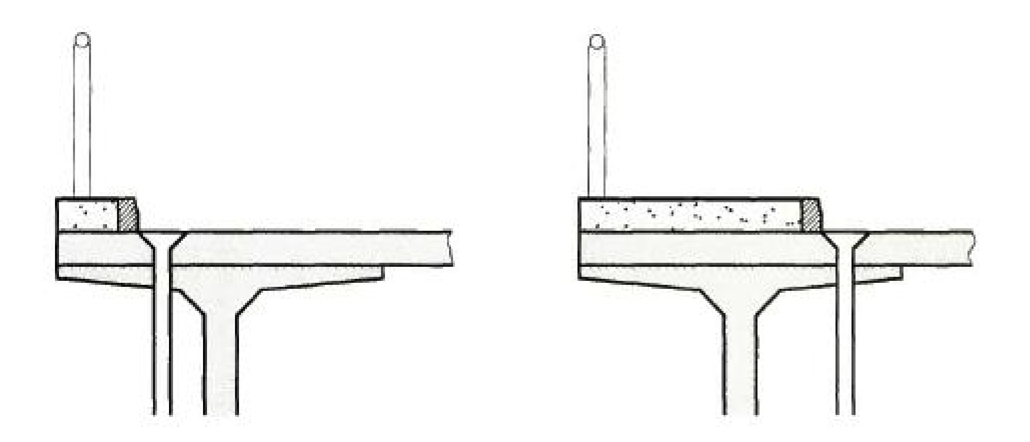


Figure 4.2: Position des poutres de rive

- Epaisseur de l'âme : en zone médiane, où l'effort tranchant est faible, les âmes sont dimensionnées au minimum constructif dans le but d'alléger le plus possible les poutres. Ce minimum dépend du mode de vibration utilisé (externe ou interne) et indirectement du type de coffrage utilisé pour la réalisation des poutres.

  b_a = 0,18 à 0,25- 0,30-0,35 m.

- Largeur de la table de compression :

Pour alléger les poutres, dans le but d'en faciliter la manutention, on serait tenté de réduire le plus possible la largeur des tables de compression. Toutefois, pour prévenir tout risque de déversement pendant les opérations de manutention, on ne descendra pas en dessous d'une largeur voisine de 60% de la hauteur, ce qui conduit à une largeur courante de 1,50 mètre.

b_t = 1,80 à 2,80 m ou (0,5 à 0,7) h_p)

- Hourdis : le rôle du hourdis est multiple. En premier lieu, il assure la continuité de surface du tablier, et permet donc de relier les éléments de la poutraison (poutres proprement dites et entretoises). Il fait par ailleurs office de table de compression de poutres et reçoit l'étanchéité ainsi que le revêtement de chaussée.

La liaison par le hourdis peut être réalisée de deux façons :

- par un hourdis intermédiaire coulé entre les poutres,
- ou par un hourdis général coulé par-dessus les poutres.

***[**Le hourdis a double rôle ; il fonctionne :*
- *Comme couverture sous action des surcharges locales,*
- *Comme membrure supérieure des poutres dans la flexion générale de l'ouvrage]*

h_d = (0,18-0,20-0,25 m) ou (b_o/16)

Hourdis général[1] : le hourdis général coulé par-dessus les poutres, l'épaisseur extrême est aussi faible que possible, mais, en pratique, elle ne pourra guère descendre en dessous de 10 cm, dimension nécessaire pour la bonne mise en place des armatures passives compte tenu des engravures nécessaires pour appuyer les coffrages perdus.

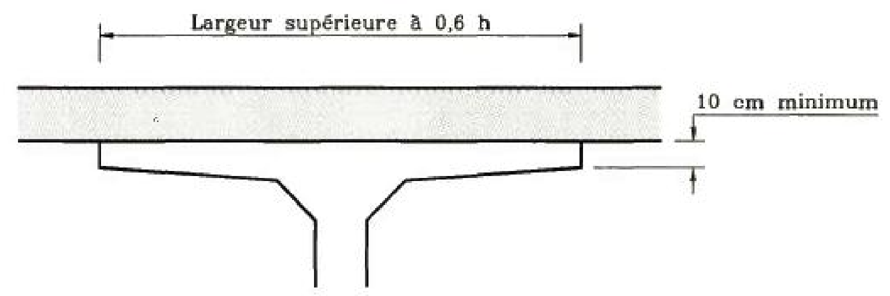


Figure 4.3: Table de compression et hourdis général

Hourdis intermédiaire[2] : Le hourdis intermédiaire est coulé entre les poutres, dans le prolongement des tables de compression. Tables de compression et hourdis constituent donc la dalle de couverture et ont de ce fait la même épaisseur et dépend donc de l'espacement des poutres

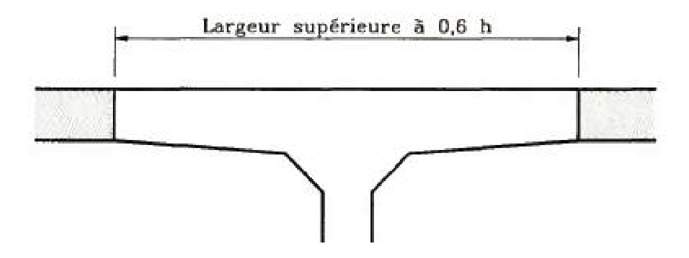


Figure 4.4: Table de compression et hourdis intermédiaire

- Prédalle (longueur et épaisseur) : c = 0,60 à 0,80 m ; d = 0,4 à 0,6 m

V.2 Talons

Les ***talons des poutres***, constituant la fibre inférieure de la structure, sont dimensionnés par la flexion et doivent permettre de loger les câbles de précontrainte dans de bonnes conditions d'enrobage et d'espacement.
En première approximation, pour un ***béton de 35 MPa*** de résistance, on pourra déterminer la largeur totale des talons par la formule empirique suivante :

$$b_{ta} = \frac{L_U \, L_{trav}}{h_p \, k}$$

Avec :
L_U : largeur du tablier,
L_{trav} : portée de la travée,
h_p : hauteur totale du tablier.
$1100 < k < 1300$; le choix de k influence notamment la valeur du rendement géométrique (ρ) de la section.

Tel que : $$\rho = \frac{I}{A.V.V'}$$

Avec :
I : moment d'inertie de la section par rapport à l'axe X passant par son centre de gravité.
A : aire de la section
V et V' : position du centre de gravité G.

Cette formule montre que la largeur totale des talons varie peu et ne dépend pas de la portée. Pour un ouvrage normalement élancé au **1/17**, la ***largeur des talons (b_{ta}) varie de 0,60 à 0,90 m*** lorsque la ***distance entre axes des poutres varie (b_0) de 2,50 m à 4,00 m.***

Par contre, elle est très sensible à l'élancement et varie comme le carré de celui-ci.
Le non-respect de l'élancement normal conduit à des talons très larges et à une augmentation rapide du poids unitaire des poutres et il ne semble pas raisonnable d'atteindre des talons ***de 1,00 m de large.***

La ***partie verticale du talon ou pied de talon (h_2) est généralement comprise entre 0,10 m et 0,20*** m pour des ***largeurs de talons (b_{ta}) variant de 0,60 m à 0,90 m***. (voir la figure ci-dessous).

La définition précise de cette dimension pourra être influencée par certains choix sur les unités de précontrainte (puissance et disposition des lits), de telle sorte que les dispositions usuelles d'espacement et d'enrobage soient bien respectées.

Le pan incliné du talon doit être relativement pentu, ce qui est favorable à une bonne mises-en œuvre du béton et conduit à faciliter le relevage des câbles de précontrainte.

Ainsi, dans le schéma ci-dessous, la ***tangente de l'angle α (tgα) est normalement comprise entre 1 et 1,5,*** et il est référable de se rapprocher de la valeur supérieure. En tout état de cause, on exclura les talons rectangulaires.

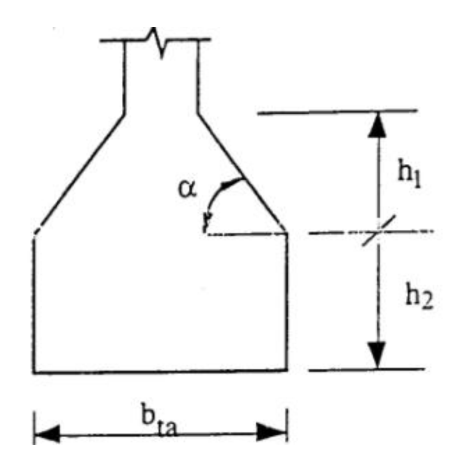


Figure 4.5: Talon d'une poutre en BP

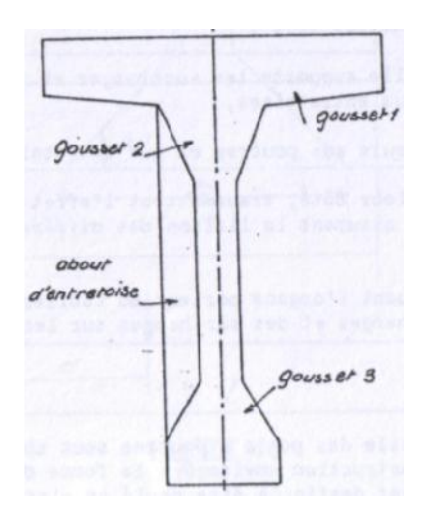


Figure 4.6: Goussets du talon d'une poutre en BA

NB :

- Le premier gousset permet l'encastrement de la dalle de couverture sur l'âme.
- Les goussets n°1 et 2, sont destinés à faciliter la mise en place du béton.

V.3 Abouts

L'extrémité des poutres, encore appelée zone d'about, est une zone relativement complexe dont la ***longueur « d » varie de 0,50 à 0,60 m***. S'y trouvent en effet la jonction avec les entretoises, l'ancrage de nombreux câbles inclinés et la zone d'appui sur le chevêtre par l'intermédiaire d'un appareil d'appui. Cette longueur est suffisante pour permettre, selon l'expression consacrée, l'arrosage de l'appareil d'appui, c'est-à-dire la diffusion jusqu'à la fibre inférieure de la poutre de l'effort de précontrainte du câble le plus bas, au niveau du dé d'appui.

Cette diffusion ne peut être assurée que si un des câbles d'about est ancré assez bas, et dans la pratique le plus bas possible.

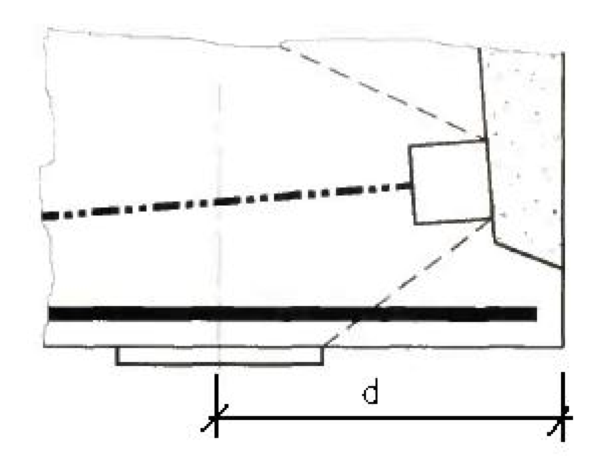


Figure 4.7: About d’une poutre

V.4 Entretoises

Les entretoises étant coulées en place, leur épaisseur résulte de conditions de bonne mise en œuvre du béton, puisque, comme pour les âmes, on doit ménager des cheminées de bétonnage entre le ferraillage passif et les conduits d'armatures de précontrainte. Dans la pratique, cela amène à une ***épaisseur de l'ordre de 0,25 à 0,40 m***, ce qui suffit dans la plupart des cas du point de vue de la résistance.

Les entretoises ont une **hauteur (h_e)** voisine de celle des poutres, ce qui leur confère une bonne rigidité.(voir la figure ci-dessous).

Du point de vue esthétique, il est préférable de diminuer légèrement leur hauteur, ce qui les rend moins visibles entre les poutres. En pratique, la jonction entre l'entretoise et la poutre coïncide souvent avec une des extrémités du pan incliné du talon. Sur pile - rappelons que les projets actuels ne comportent plus d'entretoises intermédiaires en travée - cette réduction de hauteur facilite l'accès aux appareils d'appuis en ménageant un espace suffisant entre le chevêtre d'appui et les entretoises. A cet égard, une ***distance minimale de 0,50 m semble convenable, mais il semble plus confortable de la porter à 0,80 m.***

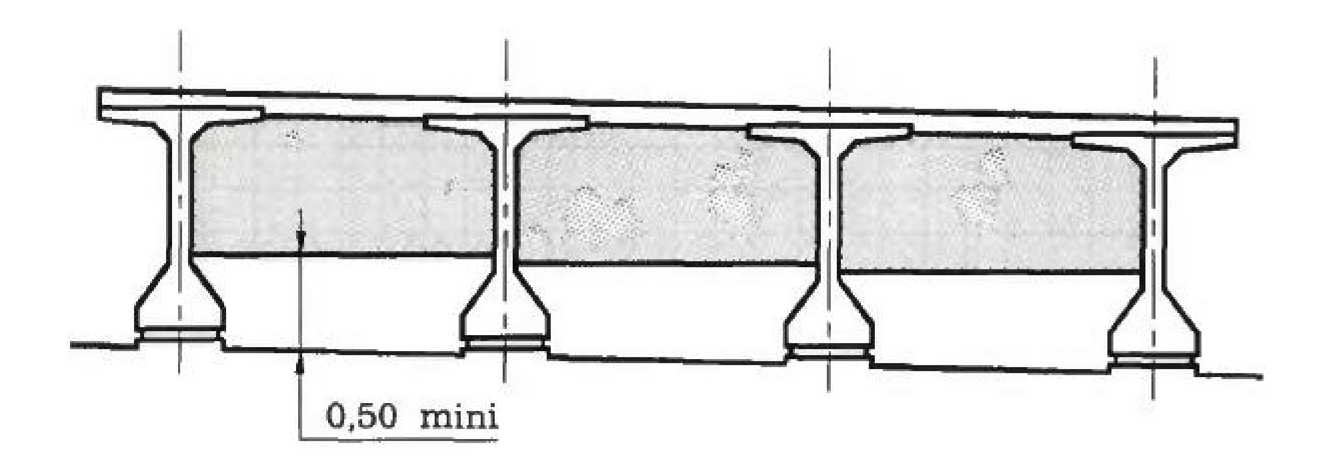


Figure 4.8 : Accès sous les entretoises d'about